

微少爆発で発生した衝撃波の挙動の解明とその応用に関する研究

著者	永易 伸生
号	1978
発行年	2001
URL	http://hdl.handle.net/10097/10785

氏 名	永易 伸生
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成13年4月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	昭和58年3月 山口大学工学部工業化学科卒業
学 位 論 文 題 目	微小爆発で発生した衝撃波の挙動の解明とその応用に関する研究
論文審査委員会	主査 東北大学教授 高山 和喜 東北大学教授 井小萩 利明 東北大学教授 升谷 五郎 東北大学助教授 佐宗 章弘 東京大学教授 田村 昌三

論 文 内 容 要 旨

第1章 結 論

爆発に伴う衝撃波現象は、産業ばかりでなく工学医療の諸分野にも応用され目覚ましい効果をあげている。近代科学工学の発展は火薬の有効利用に負うところ多大である。水中および気中微小爆発は新しい火薬の応用分野で、例えば微小爆発は大規模爆発との間に相似則が存在する。本論文は、微小爆発の爆発で発生する衝撃波の挙動を詳細に解明し、その基礎研究、及び、様々の応用に発展させた成果をとりまとめたものである。

第2章 微小爆発で発生した水中衝撃波の基礎的挙動に関する研究

本章ではアジ化銀の微小爆発を利用し水中衝撃波を発生し、その基礎的な挙動を明らかにする。

水中爆発と水中衝撃波について、これまでさまざまな研究があり、特にColeは1948年以前の研究をとりまとめている。しかし、水中衝撃波の研究は気中衝撃波に比べて未解決の問題を多く残している。特に、薬量がミリグラムをこえる爆薬の爆発特性の研究が一般的で、マイクログラムの爆薬が制御された状態で点火するかどうかは未だ不明で、その爆発を定量的に解明した研究はない。

水中爆発で発生する衝撃波は伝播にともない減衰するが、非常に限局された範囲では十分に強く実験室での利用では有効である。線形波では、異なる発生源からの二つ圧力波は伝播して収束するときには、単純に圧力の総和となる。しかし、衝撃波では波面の伝播速度は変化し、その干渉も単純ではない。その結果、反射衝撃波の形態は音波とは著しく異なり、正常反射とマッハ反射があらわれる。あるマッハ数の入射衝撃波がある傾き角度で相互に反射する時、反射は正常反射かマッハ反射のいずれかの形態をとる。強さの等しい二つの衝撃波が交差する場合も、入射衝撃波のマッハ数と衝撃波面の交差する角度によって正常反射とマッハ反射が生じる。

気体の衝撃波反射の実験、理論、数値シミュレーションの研究が数多くなされている。しかし、知見する限り

水中衝撃波の反射については十分な研究はない。

水中衝撃波が金属壁で斜めに反射する場合、その反射は正常反射かマッハ反射の形態をとるが、金属壁を伝わる応力波は斜め水中衝撃波より早く伝播するので、水中に先行した波面を形成し金属壁と接する水中衝撃波の接触点はその影響を受ける。したがって、水中衝撃波の反射の研究では、二つの同じ強さの衝撃波を相互に反射させる以外に精密な実験法はない。

本章では、まず、マイクログラムのアジ化銀ペレットをパルスレーザー光照射で水中起爆して、爆発と衝撃波の発生と挙動をホログラフィー干渉計測で定量的に明らかにした。同時に水中衝撃波履歴も測定し、微小爆発を定量的に究明した。

次に、レーザー光照射起爆の再現性の良さを活用し、二本の金属被覆導爆線（MDF ; Mild Detonating Fuse）を交差させて二つの端からそれぞれアジ化銀ペレットをはりつけてレーザー光を照射して同時起爆した。錐状衝撃波を発生し相互に干渉させ、斜面反射条件を作った。衝撃波反射をホログラフィー干渉計法を用いて観察し、水中衝撃波の正常反射からマッハ反射への遷移臨界角度を実験的に求めた。

第3章 微小爆発で発生した水中衝撃波の応用に関する研究

本章では、水中衝撃波応用研究を示す。

限局された空間、たとえば直径2～3mmの球状あるいは円筒状の空間に容易に過剰圧約10MPaの水中衝撃波を発生できることを2章で示した。特にその医療応用に内視鏡と組み合わせた探針を体内に挿入し、その先端に2～10mgのアジ化鉛をとりつけ微小発破で衝撃波を発生させ、膀胱結石を破碎・除去する方法が提唱されている。パルスレーザーの照射で衝撃波を発生させることもできるが、水中でレーザーを再現よく安定に収束させることが至難なので、レーザー光を収束した結石破碎術は未だ確立していない。高電圧の水中放電では、電極は絶縁物で被覆され太いケーブルが必要となるなどの技術的な問題が残されている。

一方、微小爆薬を光ファイバーの先端に接着して、第2章に示す小出力パルスレーザー光の照射でそれを起爆する方法は、この難点を克服する方式となる。

衝撃波体外結石破碎術では生体損傷は衝撃波と気泡の干渉に起因することが明らかにされている。生体を模擬するゼラチン中に結石をおいて衝撃波を収束させたアナログ実験では、衝撃波の収束直後にキャビテーション気泡の発生が観察された。衝撃波体外結石破碎術での臨床治療にもキャビテーション気泡があらわれる。

含水爆薬とは組成中に水を通常10～20%含む爆薬の総称で、スラリー爆薬とエマルション爆薬に大別できる。エマルション爆薬はダイナマイトと比較してその爆発威力は同等で、安全性が高く、耐水性にすぐれ、爆発生成気体の組成にも有利である。

エマルション爆薬の性能は、含有されるマイクロバルーンの物理特性に強く支配されることが論じられている。従来のマイクロバルーンの物理特性評価は、真比重、かさ密度、耐圧強度等の機械的な物理量のみが考慮され、爆轟の開始や持続に関連するマイクロバルーンの崩壊挙動やこれに基づく最適な連鎖破壊条件については報告が少ない。一般に、金属類あるいは非金属類は急激な衝撃圧を受けると弾性的な挙動を示す。通常使用される6号電気雷管の爆発圧力は、7402MPaと計算され、この作用圧力下ではマイクロバルーンは気泡として近似できる。

含水爆薬の起爆および体外衝撃波結石破碎術での生体損傷は、気泡の崩壊で生じる衝撃圧力に起因する。水力機械のキャビテーション壊食も気泡と衝撃波の干渉現象と密接につながる。複数気泡の相互干渉で発生する衝撃圧力は、単一気泡で発生する圧力よりさらに上昇するということが確認されている。複数気泡と衝撃波の干渉の研究は、理論的にも実験的にも未成熟で、今後の研究によるところが多い。

本章では、まず、水中衝撃波の医療応用について論じ、特に限局された空間での衝撃波気泡干渉を実験的に明らかにする。

次に、ゼラチンに付着した二つの空気泡と水中衝撃波との干渉を観察し、衝撃波と気泡干渉の観点からエマルジョン爆薬の爆轟特性を考察する。

第4章 気中微小爆発に関する研究：発射薬燃焼の時間制御

二段式軽ガス銃の発射薬には、無煙火薬が用いられその点火は点火玉で電気式起爆である。電気式起爆法では時間制御が劣り、高秒時精度電気雷管の着火遅れ時間のばらつきは $\pm 0.2\text{ms}$ と言われ、通常的方式ではさらに大きなばらつきを示す。東北大学流体科学研究所では、小型二段式軽ガス銃の性能向上のため、時間制御の向上を目指している。初期条件一定で小型二段式軽ガス銃から飛行体が射出する時間のばらつきを $\pm 20\text{ }\mu\text{s}$ 以内に制御できれば、様々の精密実験ができるばかりでなく二台の二段式軽ガス銃を対向させて作動し、飛行体を正面衝突させることも不可能ではない。

Qスイッチパルスレーザー光を光ファイバーを経由して爆薬を起爆する方法は非電気式起爆なので、電気式起爆法と異なり、雷や静電気、漏洩電流や迷走電流などの電氣的影響を受けず、安全性に優れた起爆法と考えられる。微小出力のパルスレーザー光起爆方式、大出力パルスや連続レーザー光で二次爆薬等での起爆が知られている。 CO_2 レーザーはプロペラントの着火の研究に幅広く利用されている。しかし、これまで小出力レーザーで火薬を着火して二段式軽ガス銃を駆動する研究はない。

爆発現象の光学可視化では、撮影の遅れ時間を数 μs 以下の高時間精度で制御する。微小爆薬をパルスレーザー光の照射で起爆する方式では電氣的ノイズなしに、起爆遅れをナノ秒以下の範囲に収めることができた。市販の発破器では、電圧プローブの使用や誘導電流等が利用され計測系が複雑になり時間制御は期待できない。電流プローブの使用も考えられるが遅れ時間が問題となる。

二段式軽ガス銃や火薬銃を精密に時間制御するためには、隔膜の破断時間、ピストンおよび飛行体の運動時間、火薬室での着火時間等を考慮しなければならない。

本章では、火薬銃駆動の時間制御を目指すプロジェクトの第一段階として、小出力パルスYAGレーザー光でアジ化銀を起爆し発射薬に伝火して、高い時間精度でまた再現性の向上を目的として発射薬を燃焼させるために、自家製のニトロセルロース薄膜カップを含めた火薬系列を考案し、点火部後方からの燃焼生成気体の漏洩を防ぐ方法を施した火薬銃の駆動法を開発した。レーザー発生装置のトリガ信号と火薬室内の圧力履歴を精密に計測して本着火方式を評価し、高い時間精度で高速飛行体発射装置を駆動する可能性を明らかにした。

第5章 プリル硝安—アルコール混合物（ANA）の特性および性能

硝酸アンモニウム（以後、硝安と略記）は化学工業の中で非常に重要な製品で、肥料の製造に使われる。一方、安価で、自ら爆発的に分解する性質をもち、有用な酸化剤なので、ANFO爆薬、含水爆薬の主成分として、ダイナマイト、硝酸塩爆薬の酸化剤として使用される。ANFO爆薬は含水爆薬、ダイナマイトと比較して、威力が弱いうえ、爆発生成気体の組成が悪い、耐水性が無いなどの欠点を有するが、安価で、発破孔への装填が容易であることから現在その生産量は爆薬生産量の70%を越えている。硝安には粉状、ポーラスプリルおよびデンスプリルがある。

バリスティックレンジは航空宇宙研究の基礎の装置として重要で、特に、地上での超音速および極超音速熱空力模擬実験に不可欠である。また、スペースデブリ衝突の模擬実験では、材料に高速でデブリを衝突させ、衝撃超高压条件下での物性研究の装置として重要である。空気弾道力学の技術のうち、二段式軽ガス銃は、高いよどみ点温度と高い飛行速度が実現でき、バリスティックレンジ特性で、一段式銃を上回る。しかし、二段式軽ガス銃は高価な装置である。一段式銃で、飛行体の出口速度1.5km/sを実現できるなら、その有用性はより高い。生田は粉状硝安と低級アルコールの混合物が高性能の発射薬となることを提案した。重要な点は、生成物の分子量が現存する発射薬のそれよりも小さいことである。

硝安や低級アルコールを多成分系の原料として用いた研究例はあるが、これまでプリル硝安と低級アルコールとの二成分系の混合物の研究は報告されていない。したがって、微小爆薬をレーザー起爆して硝安を基材とする新しい火薬利用法を開発することを目指す。

本章では、プリル硝安に低級アルコールを混合して平均分子量の低い爆発生成物を発生させ、これを火薬銃の発射薬として用いた時のバリスティック性能と爆発性能を明らかにした。

第6章 結論

本章では、微小火薬類を利用する衝撃波研究の方法を開発し、微小爆発と大規模爆発との間の相似則に着目した基礎研究と応用研究の成果をとりまとめ、また新しい火薬利用法を開発し、得られた知見を要約した。

論文審査結果の要旨

各種媒体中に制御された衝撃波をよい再現性で発生するためには、火薬類の有効利用が最も簡便で信頼性の高い方法として知られているが、火薬類の安全性や保安の考慮から、火薬の爆発を利用した衝撃波発生法は特殊な場合に限定されている。本研究は微小量の爆薬をパルスレーザー光照射で起爆する新しい実験技術を開発して、発生した衝撃波の特性を詳細に解明し様々の応用に発展させた結果をまとめたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は緒論である。

第 2 章では、水中でアジ化銀 3 マイクログラムから 100 ミリグラムのアジ化銀ペレットに Q スイッチ・ヤグ・レーザー光を照射し起爆して発生した球状衝撃波の挙動を可視化計測により詳細に明らかにし、また、細線状の金属被覆導爆線を非常によい時間精度で起爆することに成功し、その結果現れる二つの円錐状水中衝撃波を干渉させて水中衝撃波のマッハ反射現象を初めて明らかにしている。これは水中衝撃波の研究に有効な実験手法を確立するもので、評価されるべき成果である。

第 3 章では、水中衝撃波の応用に関する研究の成果をとりまとめている。まず、衝撃波と干渉した気泡の崩壊で発生するマイクロジェットが脳血栓模擬物質を貫通する過程を詳細に観測し、その知見に基づいて脳血栓血行再建術開発をする原理を確立している。これはこの方式を臨床に応用し成功を期待させる知見である。また、気泡と衝撃波の干渉過程の観察結果を含気泡爆薬の爆轟が持続される過程の解明に発展させている。

第 4 章では、無煙火薬の燃焼時間を精密に制御することが高速飛行体発射装置の高性能化に必須の要素技術となることを視野に、空気中でアジ化銀をレーザー起爆してその爆轟を黒色火薬さらに無煙火薬に伝爆させる過程に現れる遅れ時間とばらつきを、様々の火薬系列について詳細に検証し最適火薬系列を見いだしている。この着想は独創性に富み、また、その成果は将来の装置開発に有効な知見を与えている。

第 5 章では、プリル硝安-アルコール混合物の爆轟特性について論じ、特に、この混合物が取り扱いおよび安全性の上で高速飛行体発射薬として従来にない特性を示すことを明らかにしている。これは新しい知見である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、微小爆薬の爆発で現れる水中および気中衝撃波の挙動を初めて詳細に解明し、その知見を医療、発射薬燃焼の時間制御など様々なる有用技術への応用に成功したもので、衝撃波工学、火薬学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。